

## 雷达脉冲编码理论方法及应用

王岩飞\* 李和平 韩松

(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

**摘 要:** 该文提出了基于脉冲组合编码的雷达探测模式,建立了脉冲编码雷达的基本概念和理论模型。利用多脉冲组合及其时间、频率、相位参量的调制,实现脉冲信号在时间域、频率域、或者时频域结合的编码,为解决传统的脉冲及连续波雷达系统参数相互耦合约束、及其对雷达性能的限制问题,提供了基于多脉冲组合探测的新方法及理论基础。该文着重介绍了多脉冲组合探测的编码、目标信号恢复方法,以及结合研制的合成孔径雷达开展的编码方法、性能评估等实验研究。研究及实验表明,通过采用分频带脉冲编码方法,可使雷达信号采样率突破奈奎斯特采样定理限制,降低系统的实现难度,实验系统中实现了4.8 GHz采样率对5 GHz带宽信号的采样及无失真恢复,成像分辨率达到 $0.03 \times 0.03$  m;通过采用增加占空比的时域脉冲编码方法,实现了信噪比改善超过20 dB的大幅度提高;通过针对合成孔径雷达的成像特性进行2维编码,去除了信号模糊问题,实现了成像幅宽超过90 km等先进性能指标。理论及实验结果验证了脉冲编码方法在提高雷达核心性能方面的显著优势,为高性能雷达系统的实现建立了新的技术途径。

**关键词:** 雷达; 合成孔径雷达; 脉冲编码; 多脉冲组合; 连续脉冲; 高重频变参量

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)01-0001-16

DOI: 10.12000/JR19023

**引用格式:** 王岩飞, 李和平, 韩松. 雷达脉冲编码理论方法及应用[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 1-16. doi: 10.12000/JR19023.

**Reference format:** WANG Yanfei, LI Heping, and HAN Song. The theory and method of pulse coding for radar and its applications[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 1-16. doi: 10.12000/JR19023.

## The Theory and Method of Pulse Coding for Radar and Its Applications

WANG Yanfei\* LI Heping HAN Song

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

**Abstract:** This paper presents a radar working mode based on multi-pulse combination and coding, and the basic concept and theoretical model of pulse-coded radar are established. Using multi-pulse combination and the modulation of the time, frequency, and phase parameters, the pulse signal is coded in time domain, frequency domain, or time-frequency domain. Based on multi-pulse combination and coding, a new working method and theoretical basis are provided to solve the problem of coupling constraints among parameters of traditional pulse and continuous wave radars, which limits the performance of the radar system. Based on the fabricated Synthetic Aperture Radar (SAR) and its tests, the pulse coding, target signal recovery method, and pulse coding performance were studied. The study and test results show that the sampling rate of radar signals could be reduced to break through the limitation of Nyquist sampling theorem and simplify the difficulty of system implementation using frequency division pulse coding method. A 5 GHz bandwidth signal was sampled with 4.8 GHz and was recovered without distortion in the radar system, and an SAR imaging resolution of  $0.03 \times 0.03$  m was realized. By using the time domain pulse coding method with an increase of duty cycle, the signal-to-noise ratio was improved by over 20 dB. By using the two-dimensional pulse coding method, the SAR signal ambiguity was removed, and the imaging swath of over 90 km was realized. The theoretical and test results verify the significant advantages of the pulse coding method in improving radar performance, by which a new technical approach for the realization of high performance radar system is provided.

收稿日期: 2019-02-17; 改回日期: 2019-02-22

\*通信作者: 王岩飞 yfwang@mail.ie.ac.cn

\*Corresponding Author: WANG Yanfei, yfwang@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471340)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61471340)

**Key words:** Radar; Synthetic Aperture Radar (SAR); Pulse coding; Multipulse combination; Continuous pulse; High Pulse Repetition Frequency (PRF) varying parameter

## 1 引言

雷达工作的基本方式是发射探测信号、接收目标反射的信号,通过对回波信号进行处理,获取所需要的目标相关信息。雷达探测的本质是目标信息的采集及传送。探测信号与目标相互作用形成的反射回波信号,表示为探测信号与目标散射特性信号的卷积,这一过程作为一种调制方式,将目标信息加载在雷达探测信号上,通过对反射回波信号的接收和处理,实现对远距离目标信息的获取<sup>[1,2]</sup>。

从信息获取的角度而言,雷达探测信号作为信息的载体,通过发射与接收将目标信息传送给雷达,是雷达获取目标信息的关键。为了更好地获取目标信息,很多学者从不同的角度开展研究,包括合成孔径雷达(SAR)<sup>[3-9]</sup>、压缩感知<sup>[10-14]</sup>、MIMO雷达<sup>[15-19]</sup>、认知雷达<sup>[20-24]</sup>等诸多方面。与上述研究工作不同,本文的重点是针对雷达的基本工作方式开展研究。

雷达系统通常发射的探测信号为频率、相位等参量调制的脉冲或连续波信号,根据发射信号的形式可以划分为脉冲与连续波工作体制。探测信号选用的主要准则:一是针对目标的测距、测速、成像等实现雷达特定功能及性能的要求;二是针对现有技术条件下,优化雷达系统的工程实现。一般而言,探测信号形式及其参量的确定,是雷达性能要求、技术条件、工作体制等多方面因素综合折中的结果<sup>[25]</sup>。

脉冲工作体制雷达,信号的发射和接收在时间上是先后分开的,一方面使得雷达收发之间的相互影响比较小,可以提高发射功率实现远探测距离等高性能;另一方面,占空比小,需要采用高功率发射机,导致雷达设备较为复杂,体积重量增大。

连续波体制雷达,通常采用调频连续波(FMCW)工作方式<sup>[26-31]</sup>,系统发射信号和接收信号的工作同步进行,占空比大、平均发射功率大,易于实现雷达的轻小型化;然而,收发通道之间的相互影响较大,对峰值发射功率产生限制,制约了雷达的整体性能。

无论是脉冲还是连续波体制雷达,都有与其相适应的使用条件,以及限制其性能的不利条件。从提升雷达系统性能的角度而言,最好是能够结合脉冲及连续波工作体制的优点、并克服其不足。对此,最直接的方法就是采用高重复频率的脉冲来逼

近连续波,有学者提出了用脉冲序列截断连续波的准连续波体制雷达,使其能够兼顾脉冲与连续波雷达的优势<sup>[32,33]</sup>。但准连续波雷达的主要缺点是存在信号的截断误差,在很多情况下不能满足雷达的要求,例如对于合成孔径雷达(SAR),误差会进一步影响方位孔径合成处理,因此在很大程度上限制了准连续波方法的应用。

针对上述应用需求及存在的问题,本文提出了改变雷达工作体制、对发射脉冲编码进行目标探测的想法。利用脉冲的组合及其时间、频率、相位参量的调制,兼顾脉冲与连续波雷达优点、突破了原有的限制,实现雷达性能的整体提升。

在本文的以下部分,首先概述了雷达探测目标的基本原理;提出了脉冲编码探测的基本概念;在此基础上,建立了雷达多脉冲编码组合探测模型,明确了脉冲编码用于提高雷达性能的基本准则;结合实际合成孔径雷达(SAR)系统,从改善雷达信噪比、分辨率、成像幅宽等性能方面,提出了相应的脉冲编码方法,并开展了一系列实验研究,获得以往雷达系统难以达到的技术性能指标,验证了脉冲编码理论与方法的正确性和有效性。

## 2 雷达探测的基本数学模型

雷达对目标的探测过程可以通过下面的数学模型进行描述,假设目标信号为 $x(t)$ ,经过雷达探测获得的目标观测信号表示为

$$y(t) = D \cdot x(t) \quad (1)$$

其中, $y(t)$ 表示雷达接收到的信号, $D$ 表示雷达对目标的观测算子。信号的恢复则是通过对接收信号进行处理获得目标信号,表示为

$$\tilde{x}(t) = D^{-1} \cdot y(t) \quad (2)$$

其中, $D^{-1}$ 表示对信号处理的恢复算子, $\tilde{x}(t)$ 表示对目标信号 $x(t)$ 的恢复结果。

从式(1)和式(2)中可以看出,采用不同形式的探测信号则构成了不同形式的观测算子;无论采用哪种观测算子,目的是为了恢复目标信号。

理想情况下,希望恢复的信号 $\tilde{x}(t)$ 与目标信号 $x(t)$ 一致。考虑到实际条件的限制,理想的恢复信号的逆算子 $D^{-1}$ 有可能并不存在、或者对噪声敏感,难以在雷达信号处理中应用。这种情况下,可以适当放宽对恢复信号的要求。可以要求在特定的区域,如目标区域,恢复的信号 $\tilde{x}(t)$ 与目标信号 $x(t)$ 相同,表示为

$$\tilde{x}(t) = x(t), x \in S \quad (3)$$

式(3)表示当 $x(t)$ 在特定的区域 $S$ 中时,例如特定的时间区域、频率区域等,即 $x \in S$ ,恢复的信号 $\tilde{x}(t)$ 与目标信号 $x(t)$ 相同。这相当于广义的信号恢复,既放宽了对信号恢复的条件要求,同时也能够满足通常情况下的雷达探测需求。

雷达探测信号的选取主要是针对更好地获取目标信息和优化系统的实现,例如,采用线性调频信号实现大带宽和大脉宽,获得目标的高分辨率信息、增加平均探测功率和简化系统的实现等。假设发射信号为线性调频脉冲信号 $h(t)$ ,如图1所示,则式(1)的接收信号可以表示为发射信号与目标信号的卷积,如式(4)所示

$$y(t) = h(t) \otimes x(t) \quad (4)$$

这种情况下,通常直接采用脉冲压缩或者匹配滤波技术获得目标信息<sup>[1,3]</sup>,如式(5)所示

$$\tilde{x}(t) = h^{-1}(t) \otimes y(t) \quad (5)$$

式(5)的情况只是式(3)的一种特例,相当于在线性调频信号的频带宽度范围内,可以得到 $\tilde{x}(t) = x(t)$ 的结果。

一般情况下,当雷达处于正常工作状态时(如图2所示)可以直接采用上述的方法。然而,在提高雷达性能时,往往会遇到一些系统参数相互耦合约束的问题,如图3所示,加大发射脉冲宽度,会导致雷达探测盲区加大,探测范围减少等问题。

针对上述情况,会采用比较复杂的信号形式,如图4所示,发射信号为一组连续发射的脉冲,在脉冲的间隔之间接收目标的回波信号。由于雷达探测信号形式比较复杂,无法采用类似式(4)和式

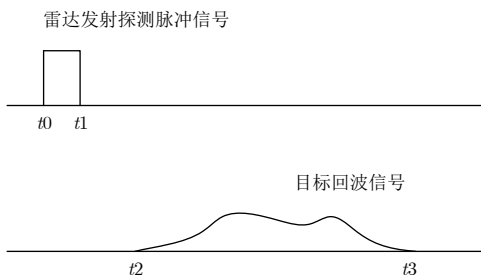


图1 脉冲雷达工作方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working mode of pulse radar

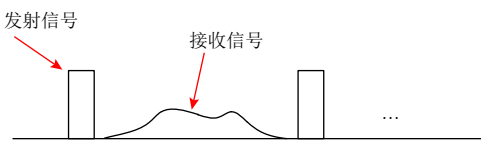


图2 脉冲雷达正常工作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of normal operation of pulse radar

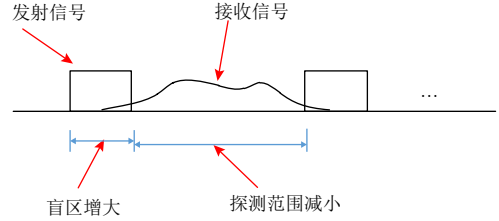


图3 脉冲宽度加大时雷达工作示意图

Fig. 3 Radar working diagram with increased pulse width

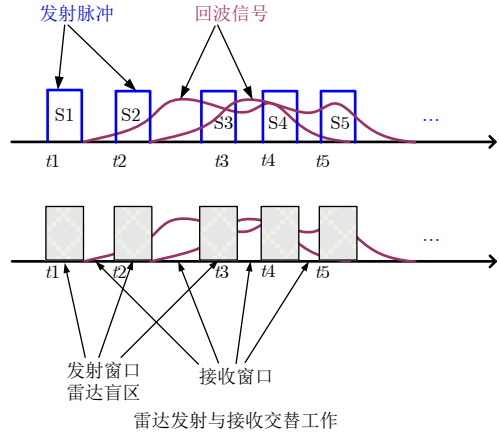


图4 脉冲组探测及其回波信号工作关系示意图

Fig. 4 Pulse group detection and its working relation diagram of echo signal

(5)的方式直接进行处理。假设图4中雷达发射的一组连续脉冲信号为 $p(t)$ ,依据式(1),雷达观测目标获得的信号表示如式(6)

$$y(t) = D \cdot x(t) = W_c[p(t) \otimes x(t)] \quad (6)$$

其中, $p(t) \otimes x(t)$ 为雷达发射信号 $p(t)$ 照射目标后得到的回波信号, $W_c$ 为在发射信号间隔期间接收回波信号的窗口函数。

这种工作方式会产生两方面的问题:(1)由于发射脉冲时不能接收信号,所以会遮挡回波信号的接收;(2)由于每一个发射脉冲都产生对应的回波信号,接收信号为各脉冲回波信号的叠加,因此存在接收信号混迭的问题。由此也可以看出,目标信号 $x(t)$ 不能像式(5)直接处理获取,需要经过解算才能获得。

### 3 雷达脉冲编码探测

#### 3.1 基本概念

脉冲编码探测是对雷达多个发射脉冲进行组合编排开展的协同探测。其中,发射脉冲的个数、脉宽、频带宽度以及脉冲之间的间隔等参数按照需要进行组合编排,称为脉冲编码。编码的方式可以根据需要采用不同的形式,例如:可以采用全频带脉冲多次重复发射;也可以采用将原始全带宽的单脉冲信号分割成为若干个部分带宽的脉冲并按照一定

规律发射。而将断续接收到的回波信号合成为完整单脉冲回波信号的处理,称为回波信号恢复。

实现脉冲编码探测,可以直观理解为,将原来的一个发射脉冲转换为的一组发射脉冲进行探测。这等效于增加了发射脉冲的重复频率,具有高占空比及平均功率等优点,但也有可能产生如图4所示的信号遮挡及混叠问题,影响到雷达对目标信息的完整获取要求。通过对多脉冲进行组合编码,并借助于式(3)对信号探测的放宽要求,为雷达提供了更为灵活和具有优势的实现方式。

与普通的单脉冲雷达直接获取目标的信息不同,雷达多脉冲组合探测需要引入目标信号的恢复处理过程,这一获取目标信息的处理及方法相对于单脉冲雷达而言并不直观。为此,本文通过图5给出的示例阐明脉冲编码探测的基本原理。

图5中的脉冲波形,是雷达发射多脉冲探测信号的一种编码方式,高电平期间表示发射信号,低电平期间表示接收信号。它分为A组和B组,每一组包含相同个数的 $N$ 个发射脉冲,每一个脉冲的脉宽 $T$ 和带宽 $W_B$ 完全一样,接收时间宽度也都为 $T$ 。两组脉冲的区别在于B组第1个脉冲前面有两个 $T$ 宽度的接收时间间隔。

可以看出,在A组的接收窗口期间,接收的只有脉冲信号在奇数 $T$ 时间段的回波信号,在B组接收窗口期间,则可接收到包含脉冲信号在奇数和偶数 $T$ 时间段的回波信号。信号恢复的目的就是希望通过两组发射脉冲间接接收信号的处理,将回波信号合成为一个完整的回波信号。为此,进行如下处理:

假设图5中的单个脉冲信号表示为 $s(t)$ ,则图5给出的连续脉冲发射信号可以表示为

$$p(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s(t - 2nT) + \sum_{n=0}^{N-1} s[t - (2N+1)T - 2nT] \quad (7)$$

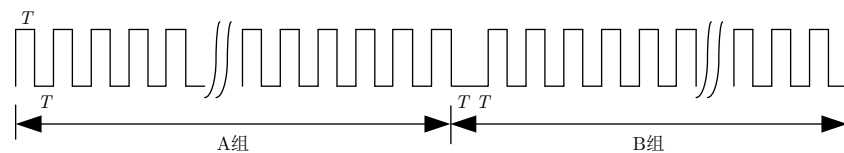


图 5 雷达多脉冲探测脉冲编码方法示意图

Fig. 5 Schematic chart of pulse coding method for radar multi-pulse detection

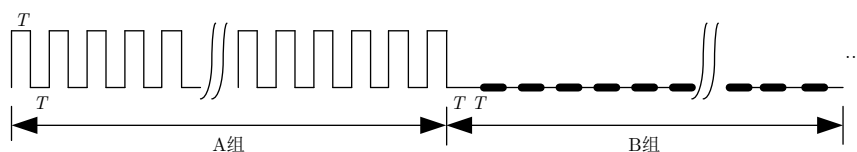


图 6 对 $p(t)$ 信号移位相减后的结果

Fig. 6 The result of subtraction of  $p(t)$  signal shift

式(7)中等号右边的两项分别表示A组和B组的 $N$ 个脉冲。对 $p(t)$ 进行如下处理

$$\begin{aligned} p_1(t) &= p(t) - p[t - (2N+1)T] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} s(t - 2nT) \\ &\quad - \sum_{n=0}^{N-1} s[t - 2(2N+1)T - 2nT] \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $p_1(t)$ 对应的信号如图6所示,在B组中,粗横线处表示原有的脉冲信号移位相减后已经对消,粗线同时表示对应的发射信号区间,无法获得接收回波信号。细线处则表示信号移位后同为接收信号相加减的窗口,表示此处的信号有效。B组以后的信号在此进行了忽略。继续对 $p_1(t)$ 信号进行处理如式(9)

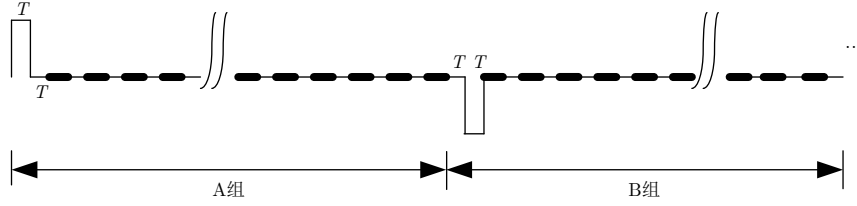
$$\begin{aligned} p_2(t) &= p_1(t) - p_1(t - 2T) \\ &= s(t) - s(t - 2NT) - s[t - 2(2N+1)T] \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $p_2(t)$ 对应的信号如图7所示。可以看出,经过延迟和加减处理得到的 $p_2(t)$ 信号为相隔一定时间的若干个脉冲信号。仔细分析图7可以看出,A组起始的脉冲可以获得奇数 $T$ 时间段窗口的回波信号,B组起始的脉冲可以获得偶数 $T$ 时间段窗口的回波信号,假设回波信号的持续时间小于 $(2N-1)T$ ,则可以直接将A组和B组的接收信号合成为一个完整的单脉冲发射信号的回波信号。

对照式(6)、式(7)可以看出,对发射信号按照式(8)和式(9)进行处理,可以得到

$$y_d(t) = D \cdot x(t) = W_c[p_d(t) \otimes x(t)] \quad (10)$$

其中, $p_d(t)$ 表示对雷达发射信号为 $p(t)$ 进行处理后得到的信号,例如式(8)和式(9)中的 $p_1(t)$ 和 $p_2(t)$ ,

图7 对 $p_1(t)$ 信号移位相减后的结果Fig. 7 The result of subtraction of  $p_1(t)$  signal shift

$y_d(t)$ 表示 $p_d(t)$ 作用于目标并经过接收窗口 $W_c$ 后得到的信号。

从式(6)和式(10)中可以看出, 由于雷达收发信号的分时工作导致了雷达接收信号存在相应的时间窗口, 信号恢复的主要工作就是恢复接收窗口之外的雷达回波信号。针对图5给出的发射信号, 信号的恢复处理工作如同式(8)和式(9)所示, 通过移位和加减运算, 在接收窗口内可以直接对接收信号 $y(t)$ 进行处理得到 $y_d(t)$ , 从而得到完整的回波信号。

从上面的讨论中可以看出, 通过对发射信号编码, 并基于式(6)和式(10)的框架对接收的间断信号进行处理, 可以实现对接收信号的完整恢复。图5给出的仅仅是发射信号的一种编码形式, 对应的信号恢复处理, 如式(8)和式(9)所示, 也主要是用以说明多脉冲信号编码与恢复的基本原理和流程, 无论从编码设计、信号恢复还是能量利用等方面考虑, 都可以选用不同的方案和方法。

从系统的角度而言, 无论雷达采用何种编码方式, 都需要遵循以下的准则: (1)发射和接收信号是可分离的; (2)能够通过脉冲之间的接收信号恢复出完整的目标回波信号。

### 3.2 脉冲编码探测信号模型

对于雷达多脉冲探测而言, 获取目标信息需要首先解决信号遮挡及信号混叠问题。在上一部分基于式(8)、式(9)的信号解算处理中, 只是针对式(7)一种特例信号的恢复。在实际多脉冲雷达中, 针对不同的应用, 需要进行不同的编码设计和解算处理。为了便于分析, 我们对多脉冲组合探测方式从数学上进行描述。

假设发射信号是脉冲组 $\mathbf{P}$ 的重复发射。 $\mathbf{P}$ 是编码脉冲组, 表示为

$$\mathbf{P} = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ \cdots \ S_L] \quad (11)$$

其中,

$$S_l = \begin{cases} S_m, & m \in (1, 2, 3, \dots, M) \text{表示发射脉冲信号} \\ 0, & l \in (1, 2, 3, \dots, L - M) \text{表示接收窗口} \end{cases} \quad (12)$$

为了简化分析, 设定发射的各个脉冲信号

$S_m$ 的时间宽度是相同的, 并以其时间宽度单位进行了归一化。对于发射脉冲宽度和接收窗口宽度不同时, 可以基于归一化的单位宽度, 通过发射脉冲编码来设计不同的发射脉冲宽度和接收窗口宽度。 $M$ 为发射脉冲的个数,  $\mathbf{P}$ 的长度为 $L$  (包括脉冲发射时间 $M$ 和不发射时的接收窗口时间 $L - M$ )。

由于雷达天线波束覆盖的区域有限, 可以假设每一个脉冲探测雷达波束覆盖区域目标的最大回波持续时间为 $K$ , 则从发射脉冲开始到接收信号结束, 整个时间长度为 $L + K$ 。去除发射脉冲时间 $M$ , 则有 $L + K - M$ 个接收窗口获取回波信号。因此, 多脉冲编码探测可以表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (13)$$

其中,

$$\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_{L+K-M}]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{X} = [X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1K}, X_{21}, \dots, X_{2K}, \\ X_{31}, \dots, X_{MK}]^T \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{R}$ 表示 $L + K - M$ 个接收窗口获取的回波信号, 是基于式(6)对各窗口接收信号的矩阵表示; 发射信号 $S_m$ 与区域目标 $\sigma$ 作用后, 获得的回波信号表示为 $X_m = \sigma \otimes S_m$ ;  $\mathbf{X}$ 表示 $(1, 2, \dots, M)$ 个发射脉冲分别对应的 $M$ 个长度为 $K$ 的回波信号, 当发射信号 $S_{m1} = S_{m2}$ 时, 对应的回波信号 $X_{m1k} = X_{m2k}$ 。

$\mathbf{A}$ 是由发射脉冲组 $\mathbf{P}$ 确定的观测矩阵, 用于确定各个发射脉冲的回波信号对不同接收窗口的回波贡献, 表示如式(16)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,MK} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,MK} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{L+K-M,1} & a_{L+K-M,2} & \cdots & a_{L+K-M,MK} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中,

$$a_{m,n} = \begin{cases} 1, & \mathbf{P}[T_{\mathbf{P}}(m) - n] \neq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

观测矩阵 $\mathbf{A}$ 的系数由式(17)确定,  $T_{\mathbf{P}}(m)$ 表示第 $m$ 个接收窗口在脉冲组 $\mathbf{P}$ 中的位置。 $a_{m,n}$ 表示在矩阵中处于接收窗口, 并且在此位置之前的 $n$ 处有

发射的脉冲信号的回波落在此接收窗口内。由于目标回波的持续时间为 $K$ ，矩阵 $\mathbf{A}$ 的系数有相当一部分为0。

由发射脉冲组 $\mathbf{P}$ 确定的观测矩阵 $\mathbf{A}$ 和获得的接收回波信号 $\mathbf{R}$ 可以获取目标的反射信号 $\mathbf{X}$ 的精准估计，如式(18)

$$\tilde{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R} \quad (18)$$

其中， $\tilde{\mathbf{X}}$ 表示获得的 $\mathbf{X}$ 的解算结果。利用矩阵 $\mathbf{A}$ 的系数有相当一部分为0，以及发射信号 $S_{m1} = S_{m2}$ 时，回波信号 $X_{m1k} = X_{m2k}$ 的特点，能够简化式(18)的逆运算。

作为说明，本文参照图5，给出的脉冲编码组如式(19)

$$\mathbf{P} = [\text{S0S0S00S0S0S0}] \quad (19)$$

其中，S表示每个发射信号都相同，0表示接收窗

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0.4490 & 0.0408 & 0.1224 & 0 & 0.2245 & 0.0408 & 0.1224 & 0 & -0.3265 & -0.2245 & 0.0816 \\ 0.2245 & 0.0204 & 0.0612 & 0.5 & -0.3878 & 0.0204 & 0.0612 & 0.5 & -0.1633 & -0.6122 & 0.0408 \\ -0.4082 & 0.3265 & -0.0204 & 0 & -0.2041 & 0.3265 & -0.0204 & 0 & 0.3878 & 0.2041 & -0.3469 \\ -0.2245 & -0.0204 & -0.0612 & 0 & 0.3878 & -0.0204 & -0.0612 & 0 & 0.1633 & 0.6122 & -0.0408 \\ 0.0816 & -0.2653 & 0.2041 & 0 & 0.0408 & -0.2653 & 0.2041 & 0 & 0.1224 & -0.0408 & 0.4694 \end{bmatrix} \mathbf{R} \quad (22)$$

可以看出，通过合理的脉冲组合编码以及式(18)的恢复运算，多脉冲组合探测方式引起的信号遮挡问题以及混叠模糊问题可以得到很好地解决。需要说明的是，脉冲编码方案在其中的作用十分关键，如果编码方案不合理，会导致式(18)的解不存在，目标信号不能完全恢复。对式(13)中 $\mathbf{X}$ 的求解，也可以选择不同的观测区间和算法进行优化和简化，如图5、图6、图7给出的计算过程所示，相对于式(18)的逆矩阵运算显然更为简单，这实际上也是一种简化求逆矩阵的算法。由于编码方案是根据使用需求确定，有关编码的具体方案将在本文的第4节中结合不同的应用给出实际方案。

雷达发射信号 $S_m$ 可以采用线性调频信号，也可以采用其它形式的信号，通常的有关雷达信号的理论方法同样适用于发射信号 $S_m$ 。本文关于脉冲编码的相关工作，是在此基础上的进一步延续和拓展。需要说明的是，雷达发射脉冲编码，是通过发射信号 $S_m$ 的组合编排及其参量调整变化来实现的，其中 $S_m$ 的参量调整变化可以归结为脉宽、脉冲间隔、脉冲频带宽度及相位。从这一角度而言，

口，S和0的时间宽度都为归一化的1个单位时间，假设每一个脉冲的目标回波持续时间为5，则目标回波为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4, \mathbf{X}_5]^T \quad (20)$$

由式(19)确定的观测矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

按照式(18)求解，可以得到

脉冲编码既包含脉冲内的信号参量调制，也包含脉冲间的信号参量调制以及参量变化的脉冲的组合。式(11)及式(12)是对脉冲编码组合方式的一个概括，可以用于表示各类形式的脉冲编码。本文在第4节中给出的各种应用及编码方案，都可以通过式(11)及式(12)表示。

由于雷达目标大多为分布目标，不同时间脉冲的回波信号存在着去相干性。脉冲编码是在通常的单脉冲重复周期内进一步增加脉冲来实现的，增加的脉冲之间的时间间隔在 $\mu\text{s}$ 或 $10 \mu\text{s}$ 之间。尽管时间较短，影响可以忽略，但如果采用持续时间过长的编码，会导致目标特性发生变化，影响最终的效果。因此，需要在脉冲编码方案中，结合具体的应用场景，考虑到目标的相干性约束问题。

脉冲编码及信号解算恢复最终达成的效果如图8所示，对脉冲进行编码组合，形成一组发射脉冲，接收信号经过恢复处理，等效于用一个能量累积的单脉冲进行探测，相当于单脉冲具有多脉冲的占空比和发射功率。同样，也可以实现对多脉冲的编码和恢复以及能量累积，如图9所示。

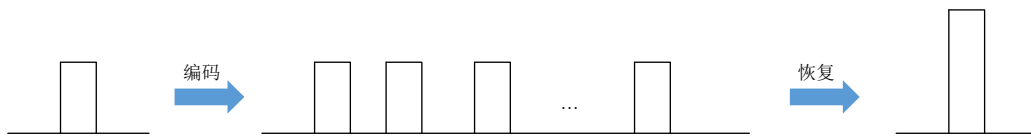


图 8 单脉冲编码与恢复工作示意图

Fig. 8 Schematic diagram of single pulse coding and recovery

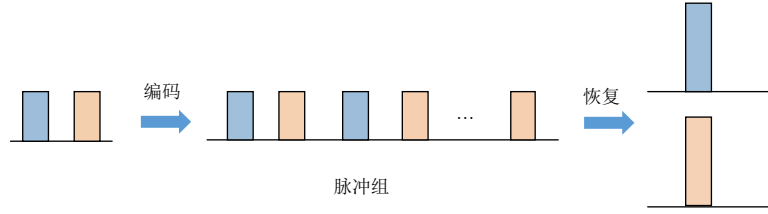


图9 多脉冲编码与恢复工作示意图

Fig. 9 Schematic diagram of multi-pulse coding and decoding

## 4 脉冲编码方法及应用

多脉冲组合探测方法的目标就是根据不同的需求，通过对脉冲组  $\mathbf{P}$  和观测矩阵  $\mathbf{A}$  的编码设计与优化，使系统具有所需求的、更好的探测性能。其中脉冲编码涉及到系统的性能需求、信号的解算恢复等多个关键的环节。为了更好地说明脉冲编码方法的运用，以及对提高雷达性能的作用，我们结合合成孔径雷达，针对提高其探测距离、分辨率、成像范围等主要性能指标，给出示例性的脉冲编码方案及应用结果。

### 4.1 提高雷达信噪比

在雷达系统中，探测距离等性能指标主要取决于信噪比，通过雷达方程建立相互作用关系。提高雷达的信噪比，一直是系统设计与实现的重要内容。SAR是一种能够对目标进行高分辨成像的相干雷达，在距离向采用脉冲压缩技术获得高分辨率；在方位向借助飞机平台的运动，通过相干积累完成孔径合成，得到高方位向分辨率。SAR系统的探测距离等性能与信噪比之间的关系，通过雷达方程表示如式(23)<sup>[2]</sup>所示。

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{av}} G^2 \lambda^3 \sigma_0}{(4\pi)^3 R^3 K T F_n L} \frac{\rho_r}{2v} \quad (23)$$

其中， $P_{\text{av}}$ 为发射功率， $G$ 为收发天线的增益，这里假设收发天线的增益相同， $\lambda$ 为信号波长， $\sigma_0$ 为目标的散射系数， $R$ 为雷达作用距离， $\rho_r$ 为雷达的距离分辨率， $v$ 为飞机的运动速度， $K$ 为玻耳兹曼常数， $T$ 为噪声温度， $B$ 为接收机带宽， $F_n$ 为系统噪声系数， $L$ 为系统损耗。

在雷达天线尺寸、接收机噪声系数、雷达频率、分辨率等其他条件不变的情况下，提高信噪比的主要途径是增加发射机的平均功率。多脉冲SAR可以利用脉冲编码的工作方式，通过增加脉冲的数量、提高占空比，并结合信号解算处理，从混叠的回波信号中恢复尽可能多的完整脉冲回波信号进行相干累加，达到提高信噪比的目的。

本文构建的连续脉冲SAR工作在Ku波段，设计的发射脉冲组由6个子脉冲组组成，表示为

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4, \mathbf{P}_5] \quad (24)$$

子脉冲组的构成为

$$\mathbf{P}_n = [S_{n1} \ 0 \ S_{n2} \ 0 \ S_{n3} \ 0 \ S_{n4} \ 0 \ 0 \ S_{n5} \ 0 \ 0] \quad (25)$$

其中， $n = (0, 1, 2, 3, 4, 5)$ 分别对应6个子脉冲组，并且在第 $n$ 个子脉冲组中 $S_{nm}$ 的取值表示如式(26)

$$S_{nm} = \begin{cases} S, & n = 0 \\ -S, & n \neq 0, m = n \\ S, & n \neq 0, m \neq n \end{cases} \quad (26)$$

其中， $S$ 是时间宽度为 $2 \mu\text{s}$ 、带宽为400 MHz的线性调频脉冲信号。由此，可以确定观测矩阵 $\mathbf{A}$ 的系数。

为了进行对比分析，本文选择汽车平台进行多次重复性实验研究。图10是多脉冲SAR与单脉冲SAR在不同模式及参数时的图像对比。可以看出，采用多脉冲编码的SAR可以使100 mW的发射功率的图像等同于20 W发射功率的单脉冲SAR图像，信噪比有比较大的改善。

为了评测脉冲编码对雷达信噪比性能的改善，假设接收信号中存在噪声 $\mathbf{N}$ ，引入式(13)可以表示如式(27)

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (27)$$

根据发射脉冲编码确定的观测矩阵 $\mathbf{A}$ 的系数，在解算目标信号的同时，也可以同步获得噪声的影响。假设系统噪声为白噪声，解算式(27)进行信噪比分析和计算，可以得到多脉冲编码与单脉冲相比的信噪比改善结果，如表1所示，每个窗口的信噪比并不完全相同，总体而言信噪比改善超过10 dB。

从前文给出的雷达参数、编码方案和试验结果中可以看出，雷达脉冲最小间隔为 $2 \mu\text{s}$ ，信号的接收存在遮挡和混叠问题。采用脉冲编码方法，可以很好地解决这一问题，可以提高脉冲重复频率(PRF)，甚至做到连续发射探测脉冲，增加信噪比。图10(a)和图10(c)中，单脉冲雷达的脉冲重复为600 Hz，图10中的经过信号恢复解算后的等效脉冲重复频率达到6000 Hz，多脉冲编码使得图像信噪比增加了11.4 dB，通过脉冲重复频率的增加获得了10 dB信噪比的增加。相对于图10(a)，信噪比有超过20 dB的改善，与图10(c)中20 W发射功率

的图像信噪比相当。这一方面是由于连续脉冲雷达图像中，有多脉冲雷达信号参与累积，增加了信噪比；另一方面，是通过增加雷达的PRF，提高了雷达的平均发射功率。从雷达系统的角度而言，提高信噪比直接关系到雷达探测距离、灵敏度、动态范围等性能的提升，甚至可以提高目标的分辨能力<sup>[34]</sup>。

脉冲编码雷达的工作方式是收发时间分离，避免了收发干扰，可以通过增加发射机功率，提高雷达的性能。同时也可以共用收发天线，减少了雷达所占用的飞机空间。并且，单个脉冲宽度较小，能够压缩雷达的探测盲区。此外，相对于单脉冲雷达，发射功率大幅度降低，有利于简化系统的实现，可采用单个芯片构建发射机。随着相关技术的发展，甚至可用于构建单个芯片雷达。从这一角度而言，脉冲编码方法将会在小型化高性能雷达技术的发展中发挥重要的作用。

### 4.2 实现雷达高分辨率

分辨率是雷达系统的重要技术指标，雷达系统主要通过增加发射信号的带宽获取距离向高分辨率。对于SAR 2维成像雷达而言，还需要通过孔径合成技术获取方位向高分辨率。这里重点考虑距离向高分辨率的实现。

宽带雷达信号直接产生和采集难度大，主要受到DA和AD等器件性能水平的限制。为了避免这些限制，传统的雷达通常采用去斜、步进调频或者频域多通道的方案<sup>[35-41]</sup>，可以降低宽带信号产生和采集的难度，但是也带来了成像范围等性能降低或者系统复杂庞大等问题，如图11、图12所示。

基于脉冲编码方法，本文提出了将雷达宽带信号分解为多个子带信号，将子带信号对应雷达的脉冲信号进行编码发射和接收，通过信号的解算恢复处理实现雷达高分辨率的方法，其工作原理示意图

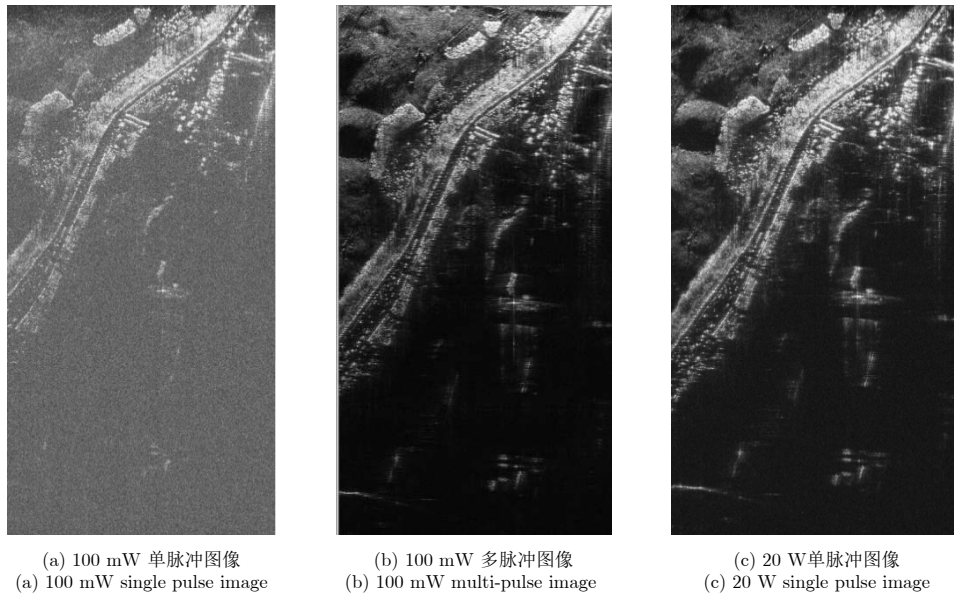


图 10 多脉冲与单脉冲SAR图像对比

Fig. 10 Comparison of multi-pulse and single pulse SAR images

表 1 多脉冲编码信噪比改善结果(与单脉冲比较)

Tab. 1 Improvement of signal-to-noise ratio of multi-pulse coding (Comparison with single pulse)

回波接收窗口	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SNR改善(dB)	13.59	9.61	11.37	11.37	11.37	11.37	11.37	11.37	11.37	9.61	13.59

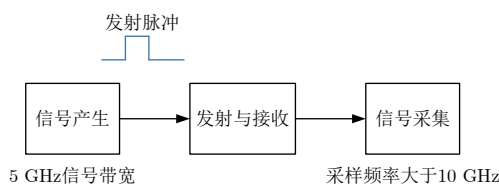


图 11 宽带信号直接产生和采样方案

Fig. 11 Direct generation and sampling of broadband signals

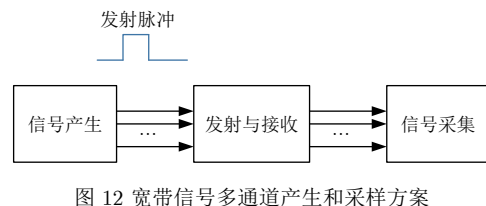


图 12 宽带信号多通道产生和采样方案

Fig. 12 Multi-channel generation and sampling scheme of broadband signal



如图9所示。采用这种方法，由于每个子带信号的带宽较小，降低了信号产生的难度；并且，如同多脉冲雷达一样，只有一个收发通道，没有增加系统的复杂度；此外，可以降低采样频率至满足子带信号采样要求即可，从整个带宽信号采样而言，突破奈奎斯特采样定理的限制，如图13所示。

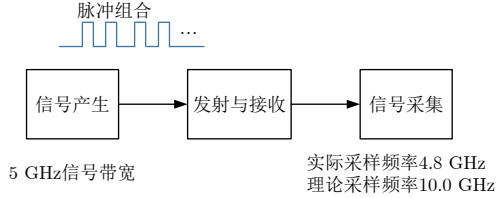


图 13 宽带信号分频带编码产生和采样方案

Fig. 13 Generation and sampling scheme of broadband signal frequency division coding

对宽带信号降采样，会导致信号在频域的频谱产生混叠模糊，通常在雷达系统中需要严格避免。而在多脉冲雷达系统中，通过脉冲的编码和解算处理，在时域将频域模糊的信号进行了恢复，实现了宽带信号的降采样率及无模糊恢复。

本文构建的多脉冲SAR工作在Ku波段，信号带宽为5 GHz，分成带宽为1.8 GHz的3个子带，设计的发射脉冲组由13个子脉冲组组成，如式(28)

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_{12}] \quad (28)$$

子脉冲组的构成为

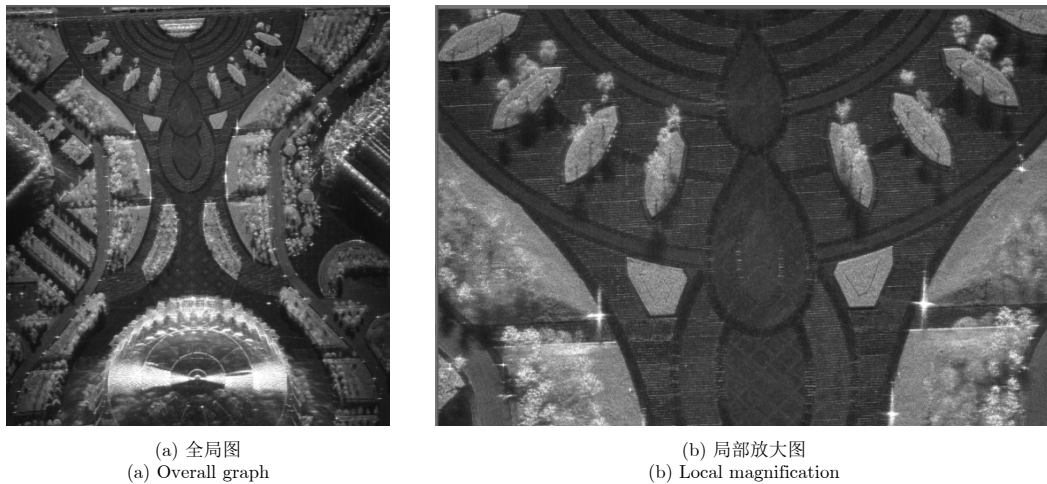
$$\mathbf{P}_n = [S_{n,1}, 0, S_{n,2}, 0, S_{n,3}, 0, S_{n,4}, 0, 0, S_{n,5}, 0, 0, S_{n,6}, 0, S_{n,7}, 0, 0, S_{n,8}, 0, 0, S_{n,9}, 0, S_{n,10}, 0, S_{n,11}, 0, S_{n,12}, 0, 0] \quad (29)$$

其中， $n = (0, 1, \dots, 12)$ 分别对应13个子脉冲组，并且在第 $n$ 个子脉冲组中 $S_{nm}$ 的取值表示如式(30)

$$S_{nm} = \begin{cases} S^a & n = 0, \text{rem}(m, 3) = 1 \\ S^b & n = 0, \text{rem}(m, 3) = 2 \\ S^c & n = 0, \text{rem}(m, 3) = 0 \\ -S^a & n \neq 0, \text{rem}(m, 3) = 1, m = n \\ -S^b & n \neq 0, \text{rem}(m, 3) = 2, m = n \\ -S^c & n \neq 0, \text{rem}(m, 3) = 0, m = n \\ S^a & n \neq 0, \text{rem}(m, 3) = 1, m \neq n \\ S^b & n \neq 0, \text{rem}(m, 3) = 2, m \neq n \\ S^c & n \neq 0, \text{rem}(m, 3) = 0, m \neq n \end{cases} \quad (30)$$

其中， $S^a$ 、 $S^b$ 和 $S^c$ 分别为3个1800 MHz的子带脉冲信号，脉冲宽度为1.2  $\mu\text{s}$ ，信号形式为线性调频信号，接收信号采样频率为 $2 \times 2.4$  GHz(分为I、Q两路)。由于SAR的数据率达到4.8 GByte/s，难以进行传输和记录，需要首先进行实时解算处理，恢复出有用的信号，去除无效数据，因此，在采用上述编码方案，除了实现宽带信号的产生和接收信号的降采样频率采样之外，还考虑到接收信号的快速恢复处理运算。基于式(28)、式(29)和式(30)的编码方案确定的观测矩阵，能够简化恢复运算，实现基于FPGA芯片的实时恢复处理，数据率降低到1.2 GByte/s。

构建的SAR系统搭载飞机平台开展实验研究，图14是获得的高分辨率雷达图像，其中图14(b)是图14(a)的局部放大图。图15和图16是图14(a)不同区域的局部放大图像，其中图15(a)、图15(b)、图15(c)分别为同一区域不同分辨率的图像，图16(a)、图16(b)、图16(c)也分别为同一区域不同分辨率的图像。通过这些SAR图像可以看出，分辨率提高对于区识别目标的显著优势。对实际场景图像中孤立点目标进行分辨率评测的结果表明，分辨率达到 $0.03 \times 0.03$  m，图17给出了其中一个典型的评测结果，其中距离向采样点间隔为0.0156 m，方位向采



(a) 全局图  
(a) Overall graph

(b) 局部放大图  
(b) Local magnification

图 14  $0.03 \times 0.03$  m 高分辨率SAR图像

Fig. 14  $0.03 \times 0.03$  m High resolution SAR image

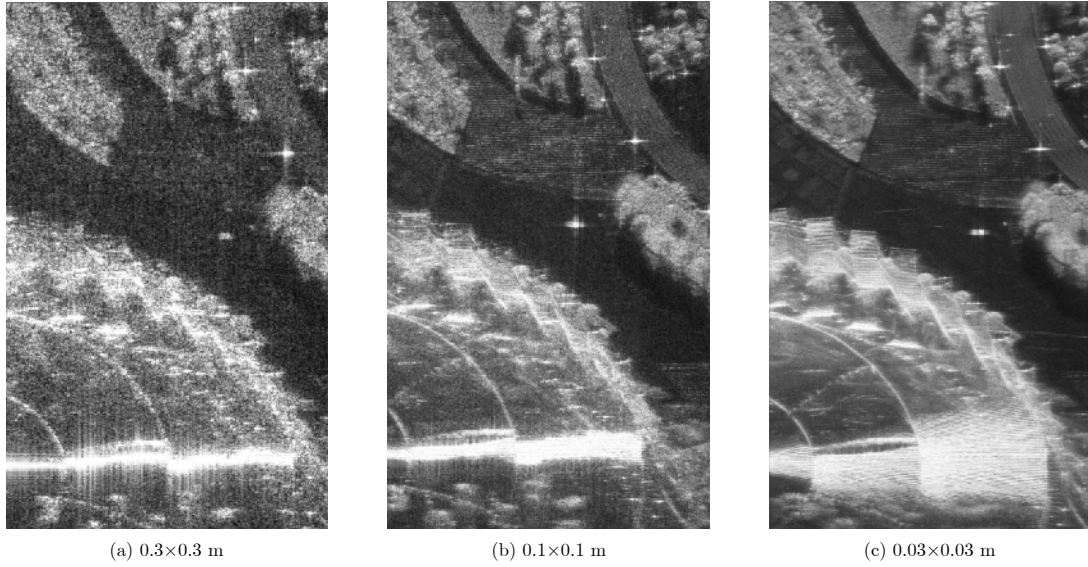


图 15 不同分辨率SAR图像对比

Fig. 15 Comparison of SAR images with different resolution

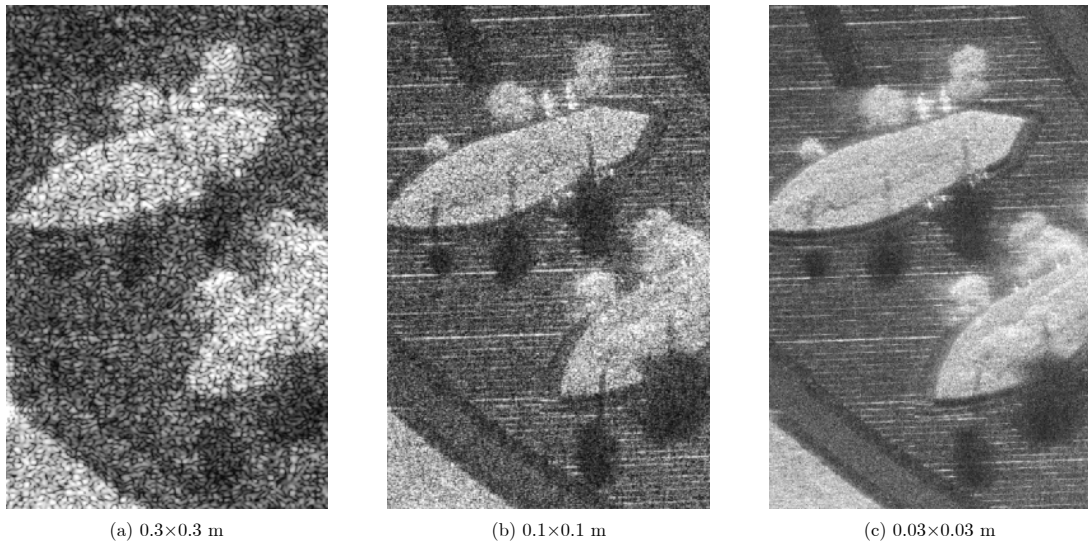


图 16 不同分辨率SAR图像对比

Fig. 16 Comparison of SAR images with different resolution

样点间隔为0.0119 m, 图17中为16倍插值后结果(分辨率为0.0253×0.0290 m)。

### 4.3 增加SAR成像幅宽

成像幅宽是合成孔径雷达的重要指标, 无论军事还是民用, 大幅宽能够提高观测效率, 具有重要的军事和经济价值<sup>[42-46]</sup>。提高成像幅宽需要增加探测距离等相关指标, 由此带来雷达系统参数相互限制等问题。

传统的SAR采用脉冲工作方式, PRF是一个关键参数。机载SAR的PRF选择受限于2个因素: 距离模糊和方位模糊。对于距离模糊而言, 要保证当前发射脉冲的全部地物回波能够在下一个脉冲到来之前被接收机接收, 否则就会产生距离模糊; 对于

方位模糊而言, 脉冲重复频率等效于方位向采样率, 按照奈奎斯特采样定理, 它必须大于回波信号的多普勒带宽。综上, 为了不产生距离和方位模糊, PRF的选择需要满足式(31)<sup>[2]</sup>

$$\frac{2v}{\lambda} \theta_{\max} = f_{d \max} \leq \text{PRF} \leq \frac{1}{\frac{2R_{\max}}{c} + T_S} \quad (31)$$

其中,  $\theta_{\max}$ 表示天线方位向波束最大宽度,  $R_{\max}$ 为最远作用距离,  $T_S$ 为发射信号脉冲宽度,  $f_{d \max}$ 表示雷达的最大多普勒频率,  $\lambda$ 为雷达波长,  $v$ 为飞机运动速度,  $c$ 为光速。

式(31)表明, 为了保证方位向信号不模糊, 希望PRF尽量高; 而为了达到更远的作用距离, 希望

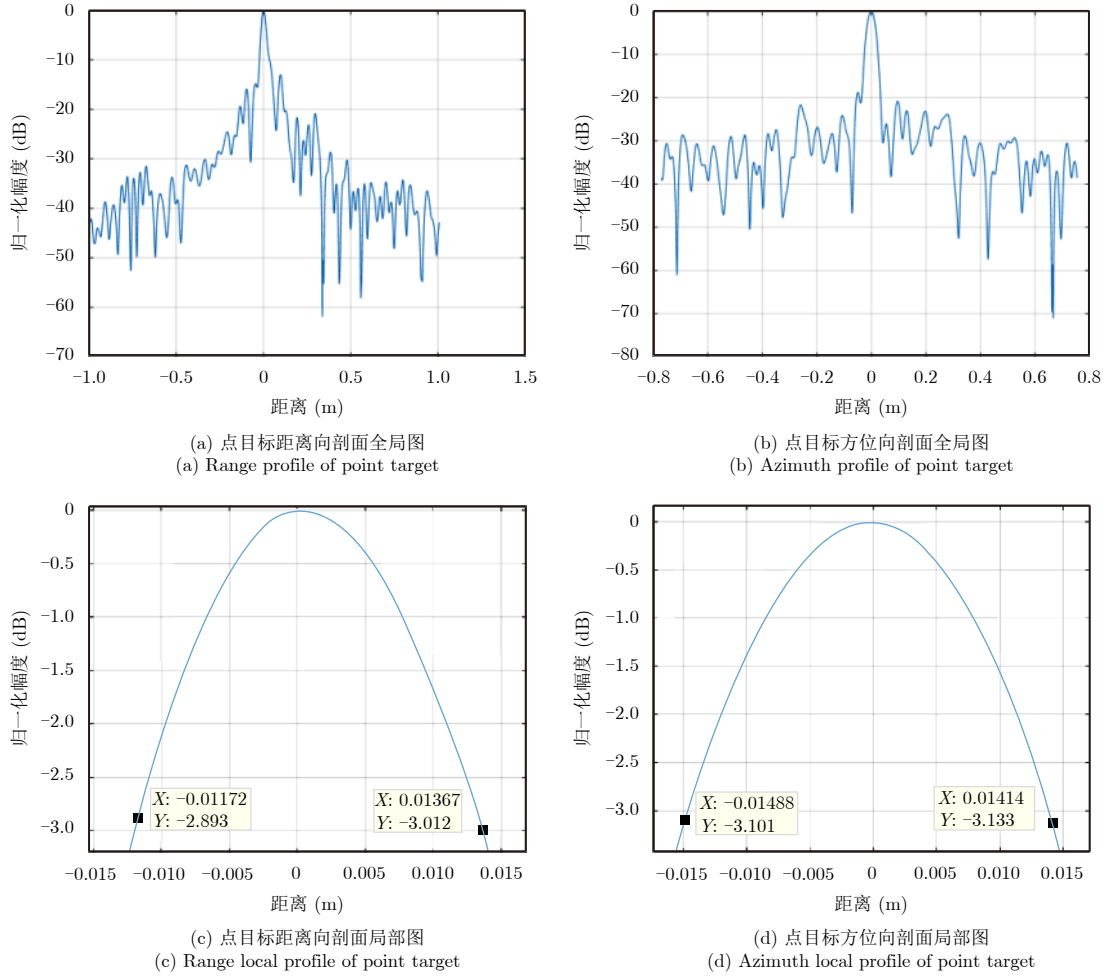


图 17 分辨率评测结果

Fig. 17 Resolution assessment results

PRF尽量低。在传统合成孔径雷达中，距离和方位模糊是一对矛盾。

假设雷达的最远作用距离为120 km，脉冲宽度为10 μs，根据式(31)确定了雷达不产生距离模糊的最高PRF为1235 Hz。假设飞机的飞行速度为80 m/s，雷达波长为0.02 m，天线最大波束宽度为10°，根据式(31)确定了雷达不产生方位模糊的最小PRT为1396 Hz。可以看出，两种要求给出的计算结果是相互矛盾的。

在之前的脉冲编码方法讨论中，所给出的编码方案实际上已经考虑和解决了雷达信号在距离向的模糊和遮挡问题。随着雷达探测距离、成像幅宽等工作条件的改变，还需要同步考虑雷达信号的方位模糊问题。为此，本文提出了对雷达脉冲进行2维编码的工作方法，通过对脉冲进行编码和恢复处理，一方面解决雷达遮挡信号的恢复问题，另一方面解决距离方位模糊问题。对雷达脉冲组进行编码的通用表达式如式(32)

$$\mathbf{P} = [C_1S_1, Z_10, C_2S_2, Z_20, \dots, C_qS_q, Z_q0] \quad (32)$$

其中，0表示接收窗口， $Z_q0$ 表示 $Z_q$ 个接收窗口， $S_q$ 表示第 $q$ 个发射脉冲， $C_q = \exp(j\varphi_q)$ 表示相位调制因子。

一种2维编码方案为

$$\mathbf{P} = [\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2] \quad (33)$$

其中，

$$\mathbf{P}_n = [C_{n,1}S, Z_10, C_{n,2}S, Z_20, C_{n,3}S, Z_30, C_{n,4}S, Z_40] \quad (34)$$

其中， $Z_1 = 3, Z_2 = 6, Z_3 = 4, Z_4 = 5$ ，相位调制因子 $C_{n,m}$ 为

$$C_{n,m} = \exp(j\varphi_q) \quad (35)$$

$$\varphi_q = \varphi_{q-1} + q \frac{2\pi}{M_q} \quad (36)$$

$$q = 4 \times n + m \quad (37)$$

式(36)中调相因子 $M_q = 3$ 。

在之前基于上述编码方案，可以确定观测矩阵，通过解算即可以恢复无遮挡的雷达信号，并且避免距离方位模糊。成像幅宽可以跨过雷达的发射脉冲，也因此可以提高雷达的PRF。

上述方案的一个特例就是通过对发射脉冲在方位向进行相位编码抑制SAR的距离模糊<sup>[47-49]</sup>。假设雷达发射单脉冲,用 $P_S$ 表示,同时得到了观测区域的完整回波,这样就可以将脉冲组表示为

$$\mathbf{P} = [C_1 P_S, Z0, C_2 P_S, Z0, \dots, C_q P_S, Z0] \quad (38)$$

其中,0表示接收窗口, $Z0$ 表示 $Z$ 个接收窗口,每一个发射脉冲组的长度为 $Q \times (Z+1)$ , $C_q = \exp(j\varphi_q)$ 表示相位调制因子,其中相位 $\varphi_q$ 为

$$\varphi_q = \varphi_{q-1} + q \frac{2\pi}{Q} \quad (39)$$

需要说明的是在式(38)中的脉冲组中,接收信号限制在 $Z0$ 窗口之内。而在式(33)、式(34)给出的脉冲组中,接收信号范围可以跨过雷达发射脉冲限制,实现更大幅宽的成像。

雷达获取的回波信号表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \mathbf{X} \quad (40)$$

针对式(38)的脉冲编码,接收窗口的回波信号 $\mathbf{R}$ 和单脉冲完整的回波信号 $\mathbf{X}$ 分别表示为

$$\mathbf{R} = [R_1, R_2, \dots, R_{Q \times Z}]^T \quad (41)$$

$$\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_{Q \times Z}]^T \quad (42)$$

观测矩阵由式(38)确定, $\varphi_q$ 由式(39)确定,取

表 2 多相编码

Tab. 2 Polyphase coding

编码方式	实现形式
2相编码	$0, \pi, \pi, 0, 0, \pi, \pi, 0, 0, \dots$
3相编码	$0, 2\pi/3, 0, \dots$
4相编码	$0, \pi/2, -\pi/2, \pi, \pi, -\pi/2, \pi/2, 0, \dots$
5相编码	$0, 2\pi/5, -4\pi/5, 2\pi/5, 0, 0, 2\pi/5, -4\pi/5, 2\pi/5, 0, \dots$
多相编码	$\varphi_q = \varphi_{q-1} + q \frac{2\pi}{Q}$

值见表2。可以看出, $Q$ 个不同距离段的回波尽管混叠在一起,但由于发射脉冲增加了相位调制相,将不同距离段的回波调制在方位向不同的频谱区域中。因此,可以在频域上将距离模糊的信号分割开来,实现对SAR信号的去模糊。

本文构建的多脉冲SAR工作在Ku波段,脉冲编码选择为2相编码,最远作用距离设计为120 km,SAR的分辨率为3 m,雷达搭载飞机平台开展大幅宽成像实验。图18是获得宽幅雷达图像,成像幅宽达到了90 km以上,图19是将雷达图像与卫星光学图像配准镶嵌的图像,经过斜距地距投影转换,地面覆盖宽度达到103 km。图像的聚焦效果良好,整幅图像没有因为信号模糊引入的虚假目标。理论与实验结果表明,脉冲编码方法可以有效解决SAR宽幅成像的去模糊问题。

## 5 结束语

随着雷达新技术的不断,对传统的雷达系统理论方法的发展也提出了新的要求。脉冲编码方法,是在对实际雷达系统问题的研究解决中,基于传统的连续波和脉冲雷达工作方法,发展出来的一种新的雷达工作方法。新方法兼容了传统的雷达工作方法,其理论上的优势通过在实际系统中的使用和实验得到了充分的验证。本文结合SAR系统,对脉冲编码方法在提高雷达信噪比、分辨率、成像幅宽等方面的工作进行了介绍,由此发展出来的新体制雷达,其性能优势还体现在其它各个方面,包括实现多功能、提高抗干扰性等。本文的重点是对脉冲编码的概念、基本原理和工作方法进行介绍,希望从雷达系统基本理论的角度,阐明解决雷达性能的技术途径问题。作为一种新的理论方法的提出和应用,尽管有很多研究需要进一步完善,所给出的方

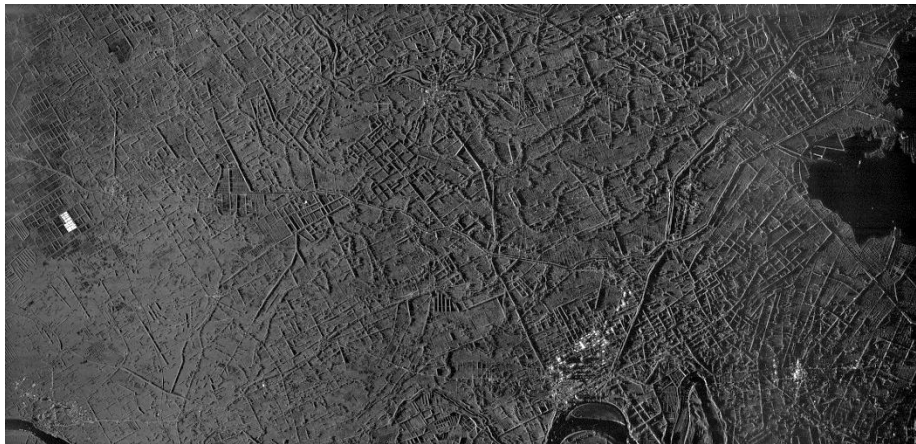


图 18 超过90 km的大幅宽SAR图像

Fig. 18 A wide-width SAR image over 90 km

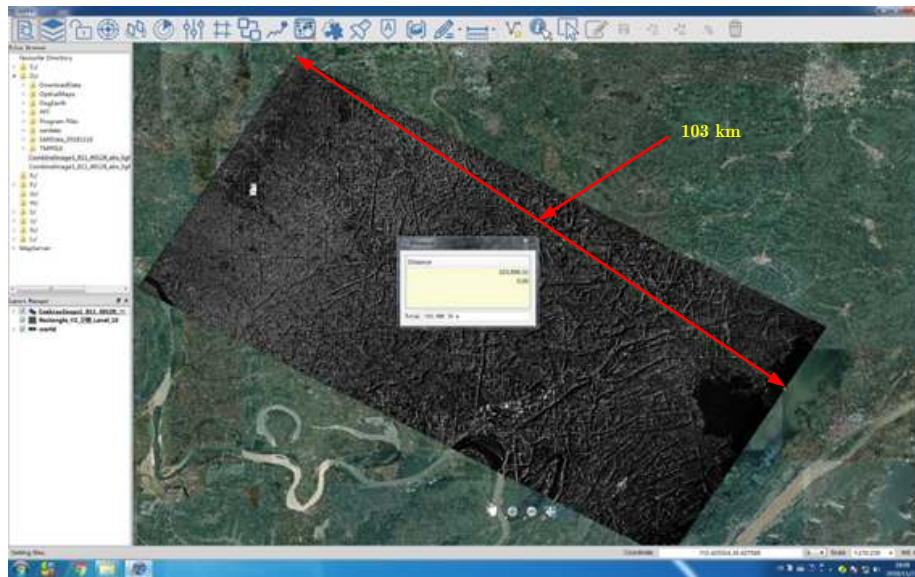


图 19 宽幅图像与卫星光学图像的镶嵌

Fig. 19 Mosaic of wide-band image and satellite optical image

法及方案也并不一定最佳，但本文的工作建立了一条实现高性能雷达的新途径，同时使雷达的性能在多个方面得到突破。在后续工作中，还需要进一步完善和优化脉冲编码方法、结合不同的雷达系统应用等开展针对性研究。

### 参 考 文 献

- [1] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 第3版, 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 1-22.  
DING Lufei and GENG Fulu. Principle of Radar[M]. 3rd ed, Xi'an: Xidian University Press, 2002: 1-22.
- [2] WEHNER D R. High Resolution Radar[M]. Norwood, MA: Artech House, 1987: 9-42.
- [3] WILEY C A. Synthetic aperture radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, AES-21(3): 440-443. doi: [10.1109/TAES.1985.310578](https://doi.org/10.1109/TAES.1985.310578).
- [4] STIMSON G W. Introduction to Airborne Radar[M]. 2nd ed, Mendham, NJ: SciTech Publishing, Inc., 1998: 393-431.
- [5] CHEN C C and ANDREWS H C. Target-motion-induced radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, AES-16(1): 2-14. doi: [10.1109/TAES.1980.308873](https://doi.org/10.1109/TAES.1980.308873).
- [6] GRAHAM L C. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6): 763-768. doi: [10.1109/PROC.1974.9516](https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9516).
- [7] ZEBKER H A and GOLDSTEIN R M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B5): 4993-4999. doi: [10.1029/JB091iB05p04993](https://doi.org/10.1029/JB091iB05p04993).
- [8] VAN ZYL J J, ZEBKER H A, and ELACHI C. Imaging radar polarization signatures: Theory and observation[J]. *Radio Science*, 1987, 22(4): 529-543. doi: [10.1029/RS022i004p00529](https://doi.org/10.1029/RS022i004p00529).
- [9] CARRARA W G, GOODMAN R S, and MAJEWSKI R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995: 1-75.
- [10] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306. doi: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
- [11] BARANIUK R and STEEGHS P. Compressive radar imaging[C]. Proceedings of 2007 IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA, 2007: 128-133.
- [12] YOON Y S and AMIN M G. Compressed sensing technique for high-resolution radar imaging[C]. Proceedings of SPIE 6968, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVII, Orlando, Florida, 2008: 69681A.
- [13] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 等. 压缩感知雷达成像技术综述[J]. 信号处理, 2011, 27(2): 251-260. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2011.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2011.02.016).  
LIU Jihong, XU Shaokun, GAO Xunzhang, et al. A review of radar imaging technique based on compressed sensing[J]. *Signal Processing*, 2011, 27(2): 251-260. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2011.02.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2011.02.016).
- [14] 张弓, 杨萌, 张劲东, 等. 压缩感知在雷达目标探测与识别中的研究进展[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(1): 1-12. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2012.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2012.01.001).  
ZHANG Gong, YANG Meng, ZHANG Jindong, et al. Advances in theory and application of compressed sensing in radar target detection and recognition[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2012, 27(1): 1-12. doi: [10.3969/](https://doi.org/10.3969/)

- j.issn.1004-9037.2012.01.001.
- [15] HAIMOVICH A M, BLUM R S, and CIMINI L J. MIMO radar with widely separated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116–129. doi: [10.1109/MSP.2008.4408448](https://doi.org/10.1109/MSP.2008.4408448).
- [16] WANG Wenqin. Large-area remote sensing in high-altitude high-speed platform using MIMO SAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(5): 2146–2158. doi: [10.1109/JSTARS.2012.2236301](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2236301).
- [17] 武其松, 井伟, 邢孟道, 等. MIMO-SAR大测绘带成像[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 772–775. doi: [10.3724/SP.J.1146.2007.01959](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2007.01959).
- WU Qisong, JING Wei, XING Mengdao, *et al.* Wide swath imaging with MIMO-SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 772–775. doi: [10.3724/SP.J.1146.2007.01959](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2007.01959).
- [18] 周伟, 刘永祥, 黎湘, 等. MIMO-SAR技术发展概况及应用浅析[J]. *雷达学报*, 2014, 3(1): 10–18. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13074](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13074).
- ZHOU Wei, LIU Yongxiang, LI Xiang, *et al.* Brief analysis on the development and application of multi-input multi-output synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(1): 10–18. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13074](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13074).
- [19] 王怀军, 许红波, 陆珉, 等. MIMO雷达技术及其应用分析[J]. *雷达科学与技术*, 2009, 7(4): 245–249. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.04.001).
- WANG Huaijun, XU Hongbo, LU Min, *et al.* Technology and application analysis of MIMO radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(4): 245–249. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.04.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.04.001).
- [20] HAYKIN S. Cognitive radar: A way of the future[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 30–40. doi: [10.1109/MSP.2006.1593335](https://doi.org/10.1109/MSP.2006.1593335).
- [21] ADVE R, HALE T, and WICKS M. Knowledge based adaptive processing for ground moving target indication[J]. *Digital Signal Processing*, 2007, 17(2): 495–514. doi: [10.1016/j.dsp.2005.06.005](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2005.06.005).
- [22] GOODMAN N A, VENKATA P R, and NEIFELD M A. Adaptive waveform design and sequential hypothesis testing for target recognition with active sensors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(1): 105–113. doi: [10.1109/JSTSP.2007.897053](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2007.897053).
- [23] 黎湘, 范梅梅. 认知雷达及其关键技术研究进展[J]. *电子学报*, 2012, 40(9): 1863–1870. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.025).
- LI Xiang and FAN Meimei. Research advance on cognitive radar and its key technology[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(9): 1863–1870. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.025).
- [24] 金林. 智能化认知雷达综述[J]. *现代雷达*, 2013, 35(11): 6–11. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.002).
- JIN Lin. Overview of cognitive radar with intelligence[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(11): 6–11. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.002).
- [25] 王岩飞, 刘畅, 詹学丽, 等. 无人机载合成孔径雷达系统技术与应用[J]. *雷达学报*, 2016, 5(4): 333–349. doi: [10.12000/JR16089](https://doi.org/10.12000/JR16089).
- WANG Yanfei, LIU Chang, ZHAN Xueli, *et al.* Technology and applications of UAV synthetic aperture radar system[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(4): 333–349. doi: [10.12000/JR16089](https://doi.org/10.12000/JR16089).
- [26] META A, DE WIT J J M, and HOOGEBOOM P. Development of a high resolution airborne millimeter wave FM-CW SAR[C]. 2004 First European Radar Conference, Amsterdam, The Netherlands, 2004: 209–212.
- [27] META A and HOOGEBOOM P. Development of signal processing algorithms for high resolution airborne millimeter wave FMCW SAR[C]. Proceedings of 2005 IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, USA, 2005: 326–331.
- [28] YAMAGUCHI Y, MITSUMOTO M, SENGOKU M, *et al.* Synthetic aperture FM-CW radar applied to the detection of objects buried in snowpack[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(1): 11–18. doi: [10.1109/36.285184](https://doi.org/10.1109/36.285184).
- [29] CHARVAT G L and KEMPEL L C. Synthetic aperture radar imaging using a unique approach to frequency-modulated continuous-wave radar design[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2006, 48(1): 171–177. doi: [10.1109/MAP.2006.1645606](https://doi.org/10.1109/MAP.2006.1645606).
- [30] 蔡永俊, 张祥坤, 姜景山. 毫米波FMCW SAR系统设计与成像研究[J]. *现代雷达*, 2016, 38(2): 1–5. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.02.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.02.001).
- CAI Yongjun, ZHANG Xiangkun, and JIANG Jingshan. A study on system design and imaging of millimeter wave FMCW SAR[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(2): 1–5. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.02.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.02.001).
- [31] 耿淑敏, 江志红, 程翥, 等. FM-CW SAR距离-多普勒成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(10): 2346–2349. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.00415](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.00415).
- GENG Shumin, JIANG Zhihong, CHENG Zhu, *et al.* Study on imaging algorithm of FM-CW SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(10): 2346–2349. doi: [10.3724/SP.J.1146.2006.00415](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2006.00415).
- [32] KHAN R H and MITCHELL D K. Waveform analysis for high-frequency FMCW radar[J]. *IEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1991, 138(5): 411–419. doi:

- 10.1049/ip-f-2.1991.0054.
- [33] 朱天林, 金胜, 王海波. 准连续波体制雷达应用研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(7): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2012.07.001.
- ZHU Tianlin, JIN Sheng, and WANG Haibo. Application on quasi-continuous wave radar[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(7): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2012.07.001.
- [34] 王岩飞, 刘中梅. SAR分布目标多视图图像分辨特性研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2294–2301. doi: 10.11999/JEIT170118.
- WANG Yanfei and LIU Zhongmei. Study on distributed targets resolution of multilook SAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2294–2301. doi: 10.11999/JEIT170118.
- [35] CANTALLOUBE H and DUBOIS-FERNANDEZ P. Airborne X-band SAR imaging with 10 cm resolution: Technical challenge and preliminary results[J]. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 163–176. doi: 10.1049/ip-rsn:20045097.
- [36] REIGBER A, SCHEIBER R, JAGER M, *et al.* Very-high-resolution airborne synthetic aperture radar imaging: signal processing and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(3): 759–783. doi: 10.1109/JPROC.2012.2220511.
- [37] ENDER J H G and BRENNER A R. PAMIR — a wideband phased array SAR/MTI system[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 165–172. doi: 10.1049/ip-rsn:20030445.
- [38] BRENNER A R. Ultra-high resolution airborne SAR imaging of vegetation and man-made objects based on 40% relative bandwidth in X-band[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 7397–7400. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351920.
- [39] BRENNER A R. Improved radar imaging by centimeter resolution capabilities of the airborne SAR sensor PAMIR[C]. Proceedings of the 2013 14th International Radar Symposium, Dresden, Germany, 2013: 218–223.
- [40] TSUNODA S I, PACE F, STENCE J, *et al.* Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar[C]. Proceedings of SPIE 3704, Radar Sensor Technology IV, Orlando, FL, 1999: 20–27.
- [41] 王岩飞, 刘畅, 李和平, 等. 基于多通道合成的优于0.1 m分辨率的机载SAR系统[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 29–35. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01370.
- WANG Yanfei, LIU Chang, LI Heping, *et al.* An airborne SAR with 0.1 m resolution using multi-channel synthetic bandwidth[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 29–35. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01370.
- [42] CURRIE A and BROWN M A. Wide-swath SAR[J]. *IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing*, 1992, 139(2): 122–135. doi: 10.1049/ip-f-2.1992.0016.
- [43] CALLAGHAN G D and LONGSTAFF I D. Wide-swath space-borne SAR using a quad-element array[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(3): 159–165. doi: 10.1049/ip-rsn:19990126.
- [44] SUESS M, GRAFMUELLER B, and ZAHN R. A novel high resolution, wide swath SAR system[C]. Proceedings of Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 2001, 3: 1013–1015. doi: 10.1109/IGARSS.2001.976731.
- [45] 宋岳鹏, 杨汝良. 应用多收发孔径实现高分辨率宽测绘带的合成孔径雷达研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2110–2113. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00140.
- SONG Yuepeng and YANG Ruliang. Study on high resolution, wide swath synthetic aperture radar using multiple transmit-receive apertures[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(9): 2110–2113. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00140.
- [46] 郭振永, 袁新哲, 张平. 一种多通道SAR高分辨率宽测绘带成像算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 310–313. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00986.
- GUO Zhenyong, YUAN Xinzhe, and ZHANG Ping. An algorithm of multichannel SAR high-resolution and wide-swath imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 310–313. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00986.
- [47] BORDONI F, YOUNIS M, and KRIEGER G. Ambiguity suppression by azimuth phase coding in multichannel SAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(2): 617–629. doi: 10.1109/TGRS.2011.2161672.
- [48] DALL J and KUSK A. Azimuth phase coding for range ambiguity suppression in SAR[C]. Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, 2004, 3: 1734–1737. doi: 10.1109/IGARSS.2004.1370667.
- [49] 曾祥能, 刘宪勋, 白洁, 等. 基于方位向多波束-多相位中心的星载SAR多维波形编码技术研究[J]. 电子学报, 2013, 41(9): 1863–1868. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.032.
- ZENG Xiangneng, LIU Xianxun, BAI Jie, *et al.* Study of space borne SAR multidimensional waveform encoding technology based on azimuth multi-beams multi-phase centers[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(9): 1863–1868. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.032.

### 作 者 简 介



王岩飞(1963-), 男, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微波成像雷达理论方法及应用、数字信号处理等。

E-mail: yfwang@mail.ie.ac.cn



韩 松(1971-), 男, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微波成像理论及系统技术、实时信息处理技术、实时信号仿真技术。



李和平(1976-), 男, 中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向为微波成像雷达新体制新方法、高速数据采集与宽带信号发生技术等。